

УДК 621.726:539.26

Г.В. КАРАКУРКЧІ, старший науковий співробітник, **М.В. ВЕДЬ**, докт. техн. наук, професор, професор кафедри,
М.Д. САХНЕНКО, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри,

І.Ю. ЄРМОЛЕНКО, канд. техн. наук, старший науковий співробітник

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ», м. Харків

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ГАЛЬВАНІЧНИМИ СПЛАВАМИ ФЕРУМУ З ТУГОПЛАВКИМИ МЕТАЛАМИ

Обґрунтовано можливість використання гальванічних сплавів феруму з тугоплавкими металами (Мо і W) для ефективного відновлення деталей під час ремонтних робіт. Установлено, що запропонований технологічний процес відповідає вимогам ресурсозбереження та екологічної безпеки. Отримані гальванічні сплави мають підвищені фізико-механічні і корозійно-електрохімічні властивості, тому їх можна застосовувати в технологіях відновлення і зміцнення зношених поверхонь.

Ключові слова: ресурсозберігаючі технології, ремонтні роботи, відновлення зношених деталей, електролітичне залізнення, гальванічні покриття сплавами, тугоплавкі метали.

Одним із важливих напрямів розвитку ресурсозберігаючих технологій у машинобудуванні та хімічній промисловості є поліпшення якості ремонтних робіт з відновлення працездатності машин і механізмів за рахунок використання нових конструкційних матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями при низькій собівартості робіт і матеріалів. Застосування раціональних технологій ремонту надає змогу швидко та якісно відновити ушкоджені машини, підвищити надійність роботи та подовжити ресурс експлуатації відновленої техніки. При цьому основним критерієм ефективності застосування певної технології ремонту є показник економічності з урахуванням продуктивності та якості ремонтного процесу.

Оскільки більшість несправностей та пошкоджень машин і механізмів відбувається через зношування робочих поверхонь вузлів, агрегатів та деталей у процесі експлуатації техніки, актуальним завданням є ефективне й раціональне відновлення зношених поверхонь за умови виконання вимог щодо ресурсозбереження та екологічної безпеки для довкілля.

Для вирішення цих завдань доцільно використовувати технології нанесення на робочу поверхню виробів електролітичних тонкоплівкових металевих покриттів з нетоксичних електролітів. Підвищені механічні характеристики поверхонь деталей і незначна витрата матеріалів для формування покриття забезпечують перспективність використання гальванічних покриттів цільового призначення та їх широке впровадження в ремонтну та виробничу практику.

Маловуглецева сталь і сірий чавун є найпоширенішими та доступними конструкційними матеріалами для ви-

робництва обладнання в машинобудівній, приладобудівній, хімічній та нафтопереробній промисловості. Проте під час експлуатації вони потребують додаткових засобів щодо захисту від механічного та корозійного руйнування. До того ж зношування таких матеріалів відбувається інтенсивніше порівняно з легованими сталями.

Відновлення зношених поверхонь деталей машин і механізмів проводять електролітичними сплавами на основі заліза [1, 2]. Гальванічне залізнення характеризується високою продуктивністю і технологічною простотою процесу, а також низькою собівартістю сформованих покриттів. Введення до їх складу додаткових легуючих компонентів дає можливість не тільки ефективно відновлювати зношені поверхні виробів, а й значно підвищувати механічний та хімічний опір відновлених поверхонь.

Електролітичне покриття залізом є більш хімічно чистим і характеризується вищими показниками зносостійкості і корозійної тривкості порівняно з покриттям маловуглецевою сталлю або чавуном.

Слід зазначити, що процеси відновлення зношених поверхонь сплавами заліза є більш економічними та продуктивними, ніж хромування та нікелювання, тому їх можна розглядати як перспективні для потреб ремонту машин і устаткування.

Формування покриттів гальванічним залізом здійснюють з гарячих та холодних хлоридних, сульфатних, фторборатних та органічних електролітів на основі солей феруму (II) як постійним, так й асиметричним струмом [1–2]. Недоліками зазначених електролітів є нестійкість через схильність до інтенсивного гідратуутворення й окиснення (це призводить до зниження ефективності процесу



та погіршення якості осадів); агресивність та екологічна небезпека, що зумовлено високою хімічною активністю хлорид-іонів. Покриття є крихкими через наводнювання і схильними до корозійного руйнування під час довгострокового зберігання.

Елімінувати вплив указаних негативних чинників та інтенсифікувати гальванічне відновлення зношених поверхонь можна декількома способами (рис. 1).

Отже, під час розробки складу електроліту та опрацювання режимів електролізу можна досягти високих показників ресурсозаощадження та екологічності процесу відновлення зношених поверхонь електролітичними покриттями.

Останнім часом замість залізнення в ремонтній практиці пропонують використовувати багатокомпонентні гальванічні сплави Fe з легуючими складовими – нікелем, хромом, молібденом, міддю, вольфрамом, титаном та іншими металами [3]. Такі електролітичні сплави характеризуються низькою собівартістю, високою швидкістю осадження, відсутністю внутрішніх напружень, широким діапазоном товщини наносимих шарів, високою адгезією до основи, а також підвищеними показниками механічного та хімічного опору.

Виходячи з функціональних властивостей сплавотвірних компонентів, для легування гальванічних покриттів заліза були обрані тугоплавкі метали молібден Mo і вольфрам W. Введення вольфраму здатне забезпечити підвищену жаростійкість та мікротвердість сплавів, а молібдену – стійкість до локальних видів корозії (міжкристалічної та пітингової).

За допомогою зазначених сплавів у ремонтних технологіях можна інтенсифікувати процес відновлення зношених поверхонь маловуглецевих сталей та чавунів з наданням їм підвищених фізико-механічних властивостей, таких як мікротвердість, зносостійкість і корозійна тривкість.

Критеріями оцінки ресурсозаощадження гальванічного виробництва є концентрації іонів сплавотвірних компонентів в електролітах та екологічна оцінка їх складу на наявність токсичних та агресивних компонентів.

Аналіз складу електролітів, які застосовують для формування покриттів ферум-молібден та ферум-вольфрам, свідчить, що вони базуються на хлоридних солях феруму (II) та молібдаті (вольфраматі) амонію [4]. Це робить зазначені електроліти нестійкими внаслідок окиснення феруму (II) як киснем повітря, так і в анодному процесі, та агресивними через наявність хлорид-іонів та амоніаку, що унеможливує отримання сплавів із значним вмістом легуючих компонентів і не відповідає умовам екологічності технологічного процесу.

Враховуючи зазначене, для опрацювання ресурсозаощаджувальної екологічно безпечної технології відновлення зношених поверхонь гальванічними сплавами заліза з тугоплавкими металами необхідно створити стабільний, нетоксичний електроліт для формування покриттів сплавами Fe-Mo та Fe-Mo-W з широким діапазоном вмісту молібдену й вольфраму, якісним зчепленням з основою, дрібнокристалічною структурою, високими показниками швидкості осадження, зносо- та корозійностійкості.

Необхідну кількість тугоплавких металів у складі гальванічного сплаву заліза за високої продуктивності процесу забезпечують використанням комплексних цитратних електролітів на основі солей Fe (III) [5]. Це дає можливість зблизити потенціали виділення Fe і легуючих компонентів (Mo, W) та виключити мимовільне окиснення Fe (II) до Fe (III). Запропонований склад електроліту для формування гальванічних покриттів сплавами Fe-Mo та Fe-Mo-W містить сіль основного металу (ферум (III) сульфат) і легуючі компоненти (натрію молібдат або



Рисунок 1 – Способи інтенсифікації гальванічного відновлення зношених поверхонь

вольфрамат), а також цитрат натрію (ліганд), сульфат натрію та боратну кислоту для забезпечення високої розсіювальної здатності й електропровідності.

Концентрації компонентів електроліту не перевищують 0,3 моль/л для ліганду та 0,1 моль/л для решти речовин, включаючи йони сплавотвірних металів. Це дає змогу вважати розроблений електроліт ресурсозберігаючим за концентрації основних компонентів [6].

Технологічний процес відновлення зношених поверхонь складається з декількох послідовних етапів (рис. 2). Якість підготовки поверхні деталей перед нанесенням покриттів забезпечує їх високу адгезію і, відповідно, якісне формування електролітичного осаду.



Рисунок 2 – Етапи відновлення зношених поверхонь деталей

Модельні експерименти з формування покриттів гальванічними сплавами феруму з тугоплавкими металами проводили на зразках із маловуглецевої сталі марки Ст. 3 і Ст. 20 та сірого чавуну СЧ 18 різної конфігурації, які підготували за стандартною методикою.

Осадження електролітичних сплавів Fe-Mo і Fe-Mo-W здійснювали з комплексних цитратних електролітів вказа-

ного складу у гальваностатичному режимі за допомогою джерела постійного струму Б5-49 та уніполярним імпульсним струмом з використанням потенціостата ПІ-50-1.1 і програматора ПР-8 в електролітичній комірці ЯСЕ-2.

Склад електролітів для формування покриттів та режими нанесення наведено у табл. 1.

З розроблених електролітів осаджуються рівномірні світлі блискучі низькопоруваті покриття сплавами феруму з молібденом і вольфрамом (як у гальваностатичному режимі, так і нестаціонарним електролізом) [7, 8]. Установлено, що на вихід за струмом і вміст сплавотвірних компонентів впливають такі чинники, як матеріал основи, режим електролізу, температура та pH електроліту [9, 10].

Дослідження складу одержаних електролітичних сплавів, морфології та топографії поверхні, що їх проведено методом електронної сканівної мікроскопії (рис. 3), свідчать про таке: з опрацьованих електролітів можна одержати покриття з масовою часткою Мо до 30–40 у бінарному сплаві та Мо до 25–38 і W до 6–9 – у тернарному.

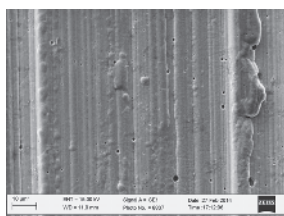
Покриття сплавами Fe-Mo та Fe-Mo-W, сформовані уніполярним імпульсним струмом амплітудою від 3,5 до 6,0 А/дм² за тривалості імпульсу $(0,5-1) \cdot 10^{-2}$ с та паузи $(1-2) \cdot 10^{-2}$ с, містять меншу кількість неметалічних включень, мають рівномірнішу поверхню та є менш поруватими, ніж сплави, осаджені в гальваностатичному режимі. Тому, щоб підвищити економічний ефект відновлення зношених поверхонь і якість сформованого покриття, доцільно застосовувати імпульсний режим роботи. В разі дотримання технологічного процесу сформовані покриття Fe-Mo та Fe-Mo-W мають незначну поруватість, оцінку якої проводять візуально за допомогою мікроскопу МБС-9 або НЕОРНОТ-21.

Розрахована швидкість осадження гальванічних сплавів феруму з молібденом і вольфрамом у всіх запропонованих режимах становить 20–25 мкм/год.

Дослідження фізико-механічних властивостей (визначення мікротвердості та стійкості при механічній

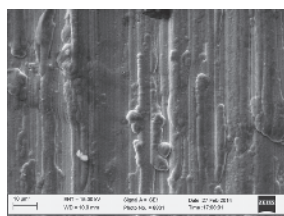
Таблиця 1 – Склад електроліту та режими формування покриттів сплавами Fe-Mo і Fe-Mo-W

Параметр процесу	Сплав			
	Fe-Mo		Fe-Mo-W	
Склад електроліту, моль/дм ³	Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·9H ₂ O	0,1	Fe ₂ (SO ₄) ₃ ·9H ₂ O	0,1
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0,08	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0,06
	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇	0,3	Na ₂ WO ₄ ·2H ₂ O	0,04
	Na ₂ SO ₄	0,1	Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇	0,3
	H ₃ BO ₃	0,1	Na ₂ SO ₄	0,1
			H ₃ BO ₃	0,1
pH електроліту	2,6–3,0		3,0–3,5	
Температура, °C	20–25		20–25	
Густина струму, j _k , А/дм ²	2,5–7,5		3,5–8,0	
Тривалість процесу, хв	15–30		15–30	
Вихід за струмом, %	65–90		65–85	

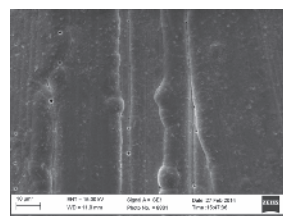


Основа – Ст. 20

Fe-Mo

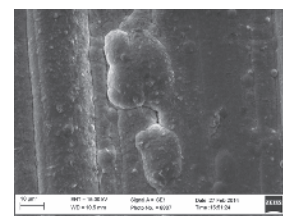


Основа – СЧ 18



Основа – Ст. 20

Fe-Mo-W



Основа – СЧ 18

Рисунок 3 – Морфологія поверхні сплавів Fe-Mo та Fe-Mo-W (збільшення $\times 1000$)

обробці) гальванічних покриттів сплавами Fe-Mo та Fe-Mo-W проводили з використанням мікротвердоміра ПМТ-3 з навантаженням 50 г і металографічного мікроскопу НЕОРНОТ-21 (збільшення $\times 100$ –500). Результати дослідження довели, що незалежно від умов формування мікротвердість отриманих покриттів сплавами феруму з тугоплавкими металами у 2,0–3,5 рази вища за основний метал (Ст. 3, Ст. 20 та СЧ 18).

Контроль міцності зчеплення покриттів з основним металом проводили методами полірування колами з бязі, фетру та інших матеріалів з використанням паст на основі оксиду хрому з органічними домішками, при цьому злам був під кутом 90° та нагрів – до температури 100–200 $^\circ\text{C}$ з витримкою покриття за цієї температури протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі. Встановлено, що сформовані покриття є рівномірними, мають високу адгезію до основи по всій поверхні, стійкі під час механічної обробки, підготовки поперекових зрізів, полірування, нагрівання та зламу.

Оцінку триботехнічних властивостей гальванічних покриттів сплавами феруму з молібденом і вольфрамом проводили на машині тертя 2070 СМТ-1 та спеціально виготовленому стенді для випробувань деталей циліндропоршневої групи дизельних двигунів. Для означених досліджень покриття сплавами Fe-Mo та Fe-Mo-W наносили на сірий чавун, з якого виготовляють маслоснімні поршневі кільця тепловозних дизельних двигунів. Контртілом служили зразки із сірого чавуну без покриття. За результатами випробувань встановлено, що сформовані покриття мають у 3–4 рази вищі антифрикційні властивості порівняно з матеріалом основи, що є передумовою покращення показників зносостійкості в разі зміцнення обох деталей у парах тертя.

Випробування гальванічних сплавів Fe-Mo та Fe-Mo-W на корозійну тривкість у середовищах різної кислотності довели, що за глибинним показником корозії k_n , який становить 0,004–0,006 мм/рік у всіх агресивних середовищах, їх можна віднести до категорії «дуже стійкі».

Отже, гальванічні покриття сплавами феруму з молібденом і вольфрамом за комплексом функціональних

властивостей можна ефективно використовувати у виробничій та ремонтній практиці для відновлення і зміцнення деталей з маловуглецевої сталі та сірого чавуну. Це дасть можливість подовжити ресурс безаварійної експлуатації таких деталей.

ВИСНОВКИ

1. З комплексних цитратних електролітів на основі сульфату феруму (III) в гальваностатичному та імпульсному режимах можна формувати рівномірні низькопористі покриття Fe-Mo і Fe-Mo-W на деталях із маловуглецевої сталі (Ст. 3, Ст. 20) та сірого легovanого чавуну (наприклад, СЧ 18).

2. Сформовані покриття Fe-Mo і Fe-Mo-W мають підвищені фізико-механічні, антифрикційні та корозійні властивості порівняно з основним металом (маловуглецевою сталлю, сірим чавуном), що надає змогу ефективно використовувати їх замість деяких коштовних легованих сталей у приладо- і машинобудуванні, хімічній та нафтопереробній промисловості.

3. Технологічний процес електроосадження гальванічних сплавів феруму з молібденом і вольфрамом відповідає вимогам ресурсозбереження й екологічної безпеки та характеризується високою ефективністю і швидкістю осадження.

4. Сукупність підвищених функціональних властивостей гальванічних сплавів Fe-Mo і Fe-Mo-W раз з характеристиками процесу осадження свідчить про можливість ефективного відновлення та зміцнення зношених поверхонь деталей з маловуглецевої сталі та сірого легovanого чавуну в ремонтному виробництві.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. **Закиров Ш. З.** Упрочнение деталей машин электроосаждением железа / Ш. З. Закиров. – Душанбе : Ирфон, 1978. – 208 с.

2. **Мелков М. П.** Электролитическое наращивание деталей машин твердым железом / М. П. Мелков. – Саратов : Приволжское книжное изд-во, 1964. – 204 с.
3. **Зеликман А. Н.** Металлургия редких металлов / А. Н. Зеликман, Б. Г. Коршунов. – М. : Metallurgia, 1991. – 432 с.
4. Применение электролитических сплавов на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин / В. В. Серебровский, Е. А. Афанасьев, Д. С. Реутов, Р. В. Степашов // Вісник Сумського національного аграрного університету. Сер. Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2012. – Вип. 6 (24). – С. 38–42.
5. **Сахненко М. Д.** Ресурсозаощаджувальна технологія відновлення зношених деталей / М. Д. Сахненко, М. В. Ведь, Г. В. Каракурчі [та ін.] // Інтегровані технології та ресурсозбереження. – 2013. – № 2. – С. 9–13.
6. Ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии в химической и нефтехимической промышленности : тез. докл. III Междунар. конф. Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. – С. 23–26.
7. Пат. 94272 Україна, МПК C25D 3/56. Спосіб нанесення покриттів залізо-молибден / Ведь М. В., Каракурчі Г. В., Сахненко М. Д., Зюбанова С. І. ; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u201404748 ; заявл. 05.05.14 ; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21.
8. Пат. 93318 Україна, МПК C25D 3/20. Гальванічне покриття сплавами заліза для зміцнення поверхні деталей зі сталі та чавуну / Ведь М. В., Каракурчі Г. В., Сахненко М. Д., Зюбанова С. І., Ермоленко І. Ю. ; заявник і патентовласник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – № u201404347 ; заявл. 22.04.14 ; опубл. 25.09.2014, Бюл. № 18.
9. **Ved M. V.** Electrodeposition of iron-molybdenum coatings from citrate electrolyte / M. V. Ved, N. D. Sakhnenko, A. V. Karakurchi, S. I. Zyubanova // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87, No. 3. – P. 276–282.
10. **Каракурчі А. В.** Электроосаждение двойных и тройных сплавов железа из цитратных электролитов / А. В. Каракурчі, М. В. Ведь, Н. Д. Сахненко, С. И. Зюбанова, И. Ю. Ермоленко // Нанотехнологии. Наука и производство. – 2014. – № 3 (30). – С. 24–26.

Поступила в редакцию

Обоснована можливість використання гальванічних сплавів заліза з тугоплавкими металами (Мо і W) для ефективного відновлення деталей при проведенні ремонтних робіт. Установлено, що пропонується технологічний процес відповідає вимогам ресурсозбереження і екологічної безпеки. Отримані гальванічні сплави мають підвищеними фізико-механічними і корозійно-електрохімічними властивостями і можуть бути використані в технологіях відновлення і упрочнення зношених поверхностей.

The possibility of using galvanic iron alloys with refractory metals (Mo and W) for the effective recovery of machine parts during repair work. It was found that the proposed process meets the requirements of resource and environmental safety. Electroplated alloys have high physical-mechanical and electrochemical corrosion properties and may be used in technologies for recovery and reinforcement of worn surfaces.

Вниманию авторов и читателей!

Информируем о возможности приобретения архивных номеров журнала, выпущенных в период с 2004-го по 2014 год.

Обращаться в отдел маркетинга:

телефон: (057) 758-07-33

e-mail: market@energostal.kharkov.ua